

석회석광산에서의 경제적인 벤치발파패턴에 대한 연구

A Study on the Economical Design of Bench Blasting in Lime Stone Quarry

이 천식¹⁾, 정 민수¹⁾, 이 윤재¹⁾, 송 영석¹⁾, 양 난주¹⁾, 강 대우²⁾
Chun-Sik Lee¹⁾, Min-Su Jung¹⁾, Yun-Jae Lee¹⁾, Young-Suck Song¹⁾, Nan-Joo Yang¹⁾,
Dae-Woo Kang²⁾

1) (주)한화, 2) 동아대학교

초 록

국내 석회석 광산에서는 벤치 발파패턴을 현장의 KNOW-HOW에 따라 가장 경제적인 발파패턴을 적용하고 있다. 그러나 인건비 재료비등 제반경비가 상승함에 따라 좀더 효율적인 발파방법의 개선이 요구되고 있는 바, 현 석회석 광산에서의 발파패턴을 보다 개선하여 경제적인 발파패턴을 적용하고, 그에 따른 고려해야 할 사항들을 본 논문에서 연구 하고자 한다. 따라서 국내 석회석 광산의 발파 패턴과 외국의 광산발파 패턴을 비교하고, 수치해석을 적용하여 기존의 발파 패턴에서 장약길이, 공간격, 장약량의 변화, 천공경은 102mm에서 115mm로 변화하고 장약방법을 단일장약에서 이중장약으로 변화하여 동해 쌍용자원에서 시험을 실시하였다. 연구 결과 장약길이의 20 % 감소는 Powder Factor를 (20%)낮게 하나, 파쇄효과는 28% 감소하고 Back Break가 (7 %)이상 발생하였으며, 천공경을 115mm로 적용하고, 장약길이를 11 % 감소를 위하여 이중장약을 적용하여 Power Factor를 10 % 낮게 하였을 때 파쇄효과는 22.45 %가 증대되었으며, 기존 동일 패턴에 Booster를 추가로 적용하였을 때 파쇄효과는 13.21 %가 증대되었고, Power Factor는 11 %가 감소되는 것을 알 수 있었다.

핵심어 : 석회석광산, Blastability, 이중장약, 대괴, Power Factor, Booster, Back Break

1. 서 론

국내의 석회석 광산에서의 발파 기술은 다년간에 걸친 자체 KNOW-HOW를 바탕으로 현장의 암반 상황에 적합한 벤치 발파공법을 채택하고 있다. 그러나 고정적인 발파공법 적용으로는 원가의 절감을 위한 발파 효과의 증대를 기대하기는 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 벤치 발파패턴을 외국의 발파 패턴과 비교 분석 하여 적합한 발파 패턴을 적용하여 시험발파를

하였다.

가장 경제적인 발파 패턴을 도출하기 위하여 천공경, 저항선, 공간격, 장약량의 변화를 시도하고 장약길이의 효과적인 분배를 위하여 이중 장약을 적용하여 발파 결과에 따른 경제성, 시공성이 고려된 적정 발파패턴을 제안하고자 한다.

2. 암반 및 발파 현황

2.1 암석 현황

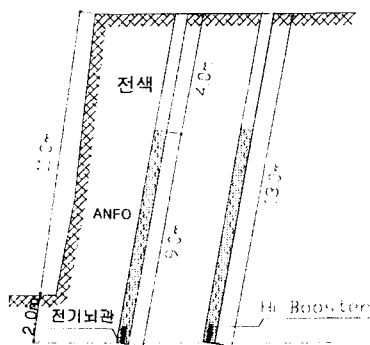
본 현장은 동해에 위치한 쌍용자원개발 현장으로 암종은 석회암 지역으로 수직 방향으로 절리가 잘 발달하여 있고 공동이 다소 분포하고 있으나 대체로 균일한 암반의 상태이다. 암석은 SiO₂ 함유율이 높고 SiO₂가 결정화를 이루고 있으며 치밀한 조직구조를 보인다. 일축강도시험과 인장강도 시험을 통하여 당 현장의 암반 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Rock Properties

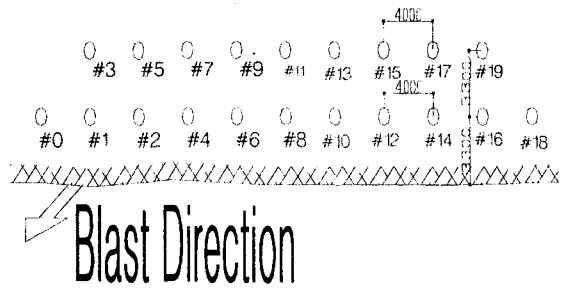
암 종	석회암
탄성파속도 (m/sec)	4,100
일축압축강도 (kgf/cm ²)	1,000
탄성계수 (10 ⁵ kgf/cm ²)	4.92
포아송비	0.267
인장 강도 (kgf/cm ²)	78

2.2 발파 현황

당 현장에서 발파패턴은 벤치 발파를 기본으로 적용하고 있으며, 주 사용 폭약은 ANFO이고 전기 뇌관을 사용하여 1 발파당 1.941ton의 채석량을 얻으며 발파 비용 원 단위는 157g/ton으로 발파를 하고 있다. 발파 현황은 Fig. 1과 Table 2에 나타낸 바와 같다.



(a) 장약 패턴도



(b) 기폭 초시 분포도

Fig. 1 Original Blasting Pattern

Table 2. Original Blasting Property

벤치 높이	11 m
천 공 경	Ψ 102 mm
천 공 장	13.0 m, 경사각도 70° Sub-Drilling 2.0m
저항선/공간격	3.3 m / 4.0 m
전 색 장	4.0 m
공당 장약량	59.54 kg
총 장 약 량	1.19 ton
비 장 약 량	157 g/ton

3. 사례 분석

기존의 발파 패턴을 분석하기 위하여 국내 실정과 비슷한 일본의 석회석 광산에서의 벤치발파 사례를 Table 3과 같이 특성을 비교하였다. 일본의 경우는 일반적으로 10~12m 정도의 벤치를 형성하여 발파를 시행하고 있으며, 국내의 경우는 그보다 더 높은 15~18m의 벤치를 형성하여 발파를 시행하고 있다.

또한 대체적으로 벤치의 높이가 높을수록 천공경을 크게 하여 발파를 시행하며, 그와 비례하여 공간격 및 저항선도 같이 증가한다. 일본의 경우는 비장약량이 0.28~0.31

kg/cm³의 분포를 보였으며 국내의 경우는 이보다 1.5배 이상인 0.45~0.51kg/cm³분포를 보였다.

일본의 경우가 벤치의 높이를 낮게 형성하여 발파를 실시하고,(Langefors의 계산식에서 천공경이 100mm이상의 경우에는 벤치의 높이가 증가할수록 비 장약량도 증가한다.) 일본은 저항선 및 공간격을 국내보다 넓게 하여 발파를 시행한다. 저항선과 공간격의 비율이 1 : 1정도를 기본으로 하나, 국내의 경우는 저항선을 짧게 잡고 있다.(석회암이라는 기본적인 역학적 물성에는 큰 차이가 없다.) 일본의 경우는 공내 장약장을 40~60%정도로 발파를 하는데 반해, 국내에서는 공내에 80%이상을 장약을 하여 발파를 시행한다.

3.1 사례 분석결과

위의 분석에 따라 국내의 발파가 비장약량이 높은 것은 폭약 폭굉시 장약의 길이에 따라 발생하는 폭발력의 감소를 고려하지 않고 1회 발파의 생산을 늘리기 위하여 과도한 벤치높이 형성이 원인이라 할 수 있다. 벤치 높이가 길어지면, 이에 따라 장약량도 증가하여야 하고 천공경, 저항선, 공간격도 늘어나야 한다. 그러나 화약의 발파

하중이 상부로 갈수록 점차 감소하므로 상부에서는 대피가 발생하고 하부에서는 Back Break의 발생을 내포한다. 따라서 경제적이고 시공성 있는 발파 패턴을 위하여 수치해석을 실시하여 적정 벤치 발파 패턴을 제시한다.

4. 벤치발파패턴 설정을 위한 시뮬레이션

ANFO 화약의 폭발 수치 해석을 통하여 폭약의 전파에 따른 폭발속도 해석과 폭약이 폭발하여 발파 하중이 암반에 미치는 손상범위를 예측하여, 이에 따른 Booster 적용 위치 및 최대 저항선 및 공간격을 선정하기 위하여 동해석 프로그램인 AUTODYN을 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. AUTODYN은 비선형 동역학 문제 해석을 위해 개발되어 폭발 및 충돌 전용 해석 프로그램으로 질량, 모멘트, 에너지 보존 방정식을 해석대상이 되는 재료의 물성표현식과 함께 고려한 explicit code이다. 이번 연구에 사용된 화약의 모델은 식 (1)과 같이 JWL Model을 적용하였다.

$$p = A\left[1 - \frac{w}{R_1 V}\right] e^{M V} + B\left[1 - \frac{w}{R_2 V}\right] e^{R_2 V} + \frac{w E}{V} \quad (1)$$

Table 3. 벤치 발파 특성 비교

구 분	벤치고 (m)	천공경 (mm)	천공장 (m)	저항선 (m)	공간격 (m)	장약장 (m)	전색장 (m)	장약량 (kg)	열수 (ea)	1발파당 공수(ea)	비장약량 (kg/m ³)
외국	10	105	11	4.0	4.0	7.2	3.8	50	3	30	0.31
	10	140	11	5.5	5.5	6.1	4.9	75	2	16	0.25
	12	165	15	6	6	7.3	7.7	125	1	10	0.29
	12	203	15	6.5	7	5.8	9.2	150	1	10	0.28
국내	15	115	15	3.6	4.3	12.5	2.5	105	2	20	0.45
	18	102	21	2.5	4.2	17	5	96	2	20	0.51

암반의 모델은 Mohr-Coulomb Model을 적용하였고, 파손 범위를 예측하기 위하여 isotropic continuum damage model을 적용하였다. 이 Damage model은 암석을 동일방향과 균일하다고 가정하여, 등가 인장변형율이 초기 변형률보다 점차 작아지게 되면 식 (2)과 같이 암반의 손상을 함수로 나타낼 수 있다.

$$F_D(\epsilon_{ij}, K_D) = \epsilon - K_D(D) \leq 0 \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 등가 인장변형율이며, ϵ_{ij} 는 주변형률이며, $K_D(D)$ 는 초기 변형을 나타내는 함수이다. 암반의 손상진행은 기존에 있는 미세 크랙으로부터 발전이 되며 시간에 따라 원형대로 되돌아갈 수 없고 축적이 되어있는 상태이다. 따라서 암반은 정적 응력보다 크지 않은 압력을 받을 때는 암반손상이 발생이 되지 않고 변형이 이루어지지 않는 것을 알 수 있다. Isotropic Continuum Damage Model은 등방적이고 균일하게 가정을 하였으므로, Liu 와 Katsabanis가 제안한 식 (3)으로 등가인장변형률에는 미세 크랙을 내포한다고 볼 수 있다.

$$C_d = \alpha \langle \epsilon - \epsilon_{cr} \rangle^\beta \tau \quad (3)$$

여기서 C_d 는 단면 부피당 총 크랙수(크랙 밀도)이며, α, β 는 물질 상수 이며, ϵ_{cr} 은 정적 인장 변형율이고, τ 는 손상의 축적 시간을 나타낸다. 여기서 손상 범위를 나타내기 위하여 Whittaker et al이 제안한 크랙 밀도에 의한 손상 정도는 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$D = P_f = 1 - e^{-C_d \nu} \quad (4)$$

4.1 VOD(폭발속도)해석 및 손상 범위 해석

폭발속도는 저폭속에서 시작하고 정적 속도까지 변화하여 고폭속에 이르고 정적 속도로 다시 되돌아간다. 따라서 당 현장의 벤치 높이와 장약길이를 고려하여 화약에 따른 폭발 속도 해석을 실시하였다. 해석 방법은 Table 4와 같이 Coupling 프로세서를 적용하여 화약은 Euler Method로 적용하여 폭발시 mesh의 형상이 변화하는 것을 방지하였으며, 암반은 Lagrange method로 적용하여 Hydro 상태와 파손의 범위를 나타내었다.

Table 4. Method of numerical modelling

Classify	Explosive		Rock (Limestone)
	MegaMITE	ANFO	
EOS	JWL	JWL	Linear
S-M	Hydro	Hydro	Mohr-Coulomb
Damage Model	None	None	Iso Con damage
Processor	Euler	Euler	Lagrange

경계조건은 Non Reflecting인 Transmit로 하였으며, 각 화약의 물성은 Table 5로 적용을 하였다. 암반의 물성은 Table 6과 같고, Damage Model의 물성은 Table 7과 같다. 해석 Geometry는 Fig 2와 같이 최초 프라이머 기폭에 따른 ANFO의 폭발 속도를 거리별로 알아보기 위하여 하부로부터 2m 간격으로 Target을 정하여 해석을 하였다.

폭약 폭발 시 발파 하중에 따라 파괴 대상체인 암반에 어느 정도 파괴를 미치는지 알아보기 위하여 Boundary Condition은 반사되는 인장파에 의한 파괴의 범위를 체크하기 위해 반사경계 조건을 적용하였고 기존의 저항선만큼의 자유면을 형성하도록

3.0m의 길이를 나타냈으며 폭약의 폭발 Target에서부터의 손상 범위를 알아보았다.

Table 5. Explosive Properties of JWL Model

A (kPa)	2.29×10^7
B (kPa)	5.5×10^6
R1	6.5
R2	1.3
ω	0.34
PC-J (kPa)	3.46×10^6
ρ (kg/cm ³)	0.83
E0 (Mj/m ³)	3.9×10^6
C (m/sec)	3900

Table 6. Lime stone Properties of Mohr-Coulomb Model

ρ (kg/cm ³)	2.65
C (m/sec)	4100
σ_c (MPa)	80
σ_{st} (MPa)	19
E (GPa)	67
Bulk modulus	41
shear modulus	27

Table 7. Isotropic continuum damage model criteria

ϵ_{cr}	0.287×10^{10}
α	6.9×10^{10}
β	2
ϵ	0.22

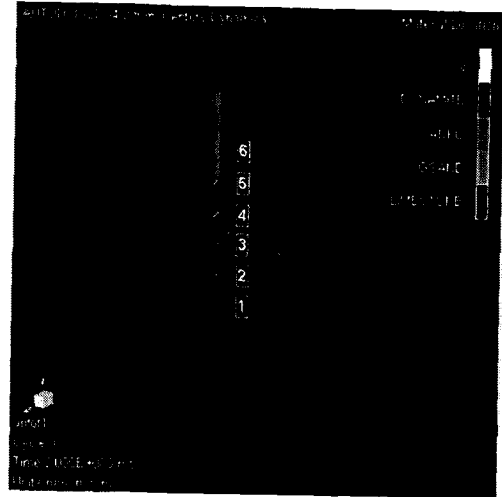


Fig. 2 Model Geometry

4.2 수치 해석 결과

장약 하부로부터 2m 간격으로 폭발 속도는 Table 8과 같이 나타난다. 이때의 파쇄 범위는 Table 9와 같이 3.95m ~ 2.65m로 발생하였다. 이는 폭약이 폭발시 최초 공저부에서는 충분한 파쇄를 나타내는 폭발속도를 나타내지만 상부로 올라가면서 줄어들며, 하부 6m 지점부터는 폭발속도가 현저히 줄어들어 발파하중이 암반의 증가 인장변형률에 미치지 못하여 파쇄 범위가 줄어드는 것을 알 수 있다. 이와 같은 해석을 함으로 얻어진 결론은 다음과 같다.

폭굉 전달시 화학 반응에서의 에너지 감쇠에 따라, 장약 길이가 길어짐에 따라 폭발력이 현저히 감소되어 나타나며, Damage Zone도 폭발력에 따라 적어짐을 알 수 있다. 따라서 ANFO 적용시 5m 내외에 Booster를 사용하거나, 이중장약을 적용하여 전 장약장에 폭발 속도를 동일하게 하여 발파효율을 극대화 할 수 있다

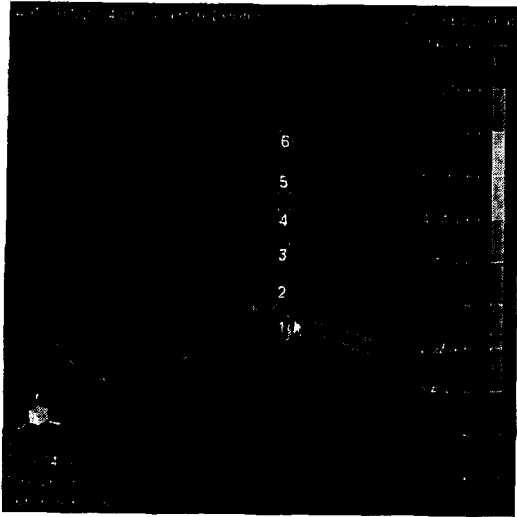


Fig. 3 YLD Stress at 8.66E-3 ms

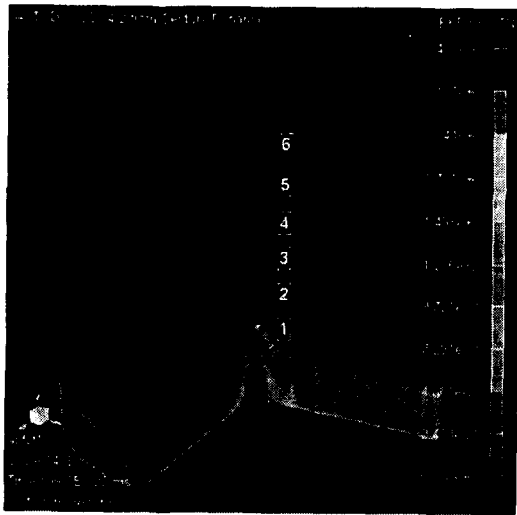


Fig. 4 EFF PL Strain at 8.66E-3 ms

Table 8. VOD at Point

Point	VOD (m/sec)	Point	VOD (m/sec)
1	1,997	4	3,125
2	2,453	5	3,625
3	2,845	6	3,868

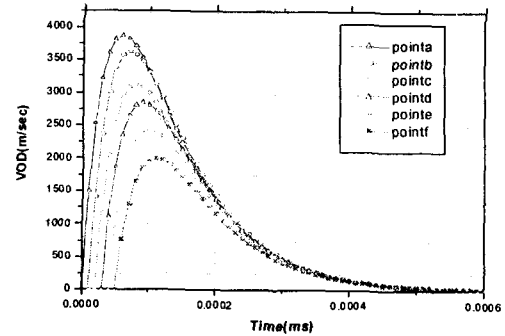


Fig. 5 VOD Graph of Point

Table 9. Range of Damage at Point

Point	Damage Zone	Point	Damage Zone
1	3.00 m	4	2.14 m
2	2.90 m	5	1.95 m
3	2.45 m	6	1.67 m

5. 추천 발파 패턴 선정

외국의 석회석 광산에서의 사례조사와 폭발 수치해석에 따라 발파효율의 증대를 통한 원 단위 감소와 2차 소환 발파를 줄이기 위하여 3가지 패턴을 제안하여 Fig 6과 같이 시험을 실시하였다. 각 발파 패턴의 기폭시스템은 기존의 발파와 동일하게 하며 Table 10과 같이 적용하였다. 각 Test 발파는 3회씩 적용하였다. Test #1은 기존의 발파 패턴과 동일 천공경에 외국의 사례와 같이 장약장을 20%줄여서 7.2m 장약을 하고 저항선과 공간격은 동일하게 하여 발파를 실시하였고, Test #2는 천공경을 115 mm로 증가하여 Deck Charge를 적용하고, 장약을 분산하여 하단에는 6m 장약을, 상단에는 2m 장약을 하여 기존의 발파에 비해 장약장을 11%

줄이고 천공경의 크기에 따라 공간격과 저항선은 각각 11%증가하여 시험 발파를 실시하였다.

Test #3은 기존 발파와 동일한 천공경, 공간격과 저항선에 장약길이를 11% 줄이고 Deck Charge에 의한 작업의 불편함을 덜기 위하여 5.5m 지점에 프라이머를 첨가하여 시험발파를 실시하였다.

Table 10. 발파 패턴

구 분	벤치 높이 (m)	천공경 (mm)	저항선 (m)	공간격 (m)	공당장약량 (kg/공)	장약장 (m)	전색장 (m)	비장약량 (g/ton)
기존 발파	11	102	3.3	4	59.54	9	4	154.74
Test #1	11	102	3.3	4	47.63	7.2	5.8	123.79
Test #2	11	115	3.7	4.5	67.27	8	5	138.61
Test #3	11	102	3.3	4	52.92	8	5	137.54

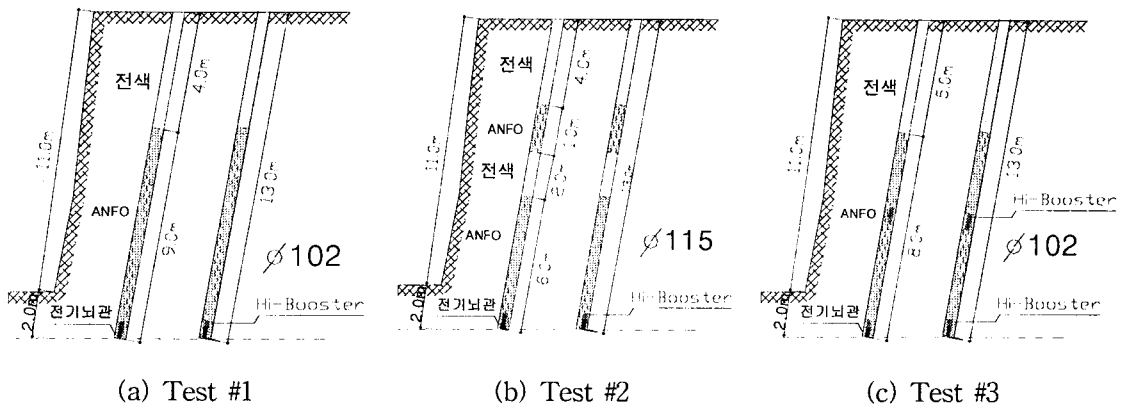


Fig. 6 발파 패턴도



(a) 벤치 현황

(b) 장약

(c) 발파

Fig. 7 발파 현황

6. 발파 결과





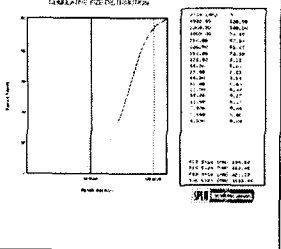
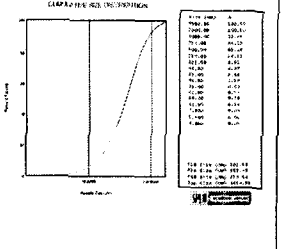
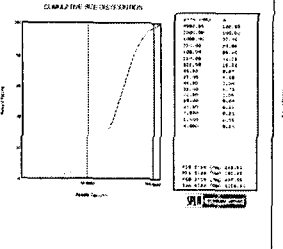
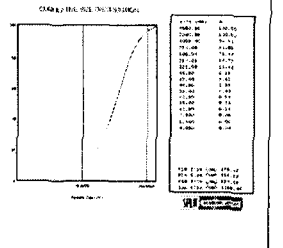
당 현장에서는 진동에 의한 발파제약을 받지 않으므로 발파진동은 고려하지 않고, 발파 후 버력의 상차 및 2차 작업의 용이성을 나타내기 위하여 발파 후 Table 11과 같이 영상 파쇄입도분석 프로그램인 Split Desktop으로 발파 결과를 나타내었다. 기존 발파의 평균 파쇄입도는 36cm로 발생되었으며 대피의 발생율은 5.6%를 나타내고 있다. Test #1은 평균파쇄입도는 38cm이고 대피의 발생은 7.8%이고, Test #2는 평균파쇄입도는 29.4cm이고 대피의 발생은 4.3%이며, Test #3의 평균파쇄입도는 31.8cm이고 대피의 발생은 4.8%가 나타났다.

7. 결론

기존 발파와 시험 발파 실험 결과는 다음과 같다.

1) 장약량을 줄이기 위하여 외국의 사례와 같이 장약장을 줄였을 때, 대피의 발생율이 기존 발파 보다 22.21 %가 증가하고 평균 파쇄입도는 5.26% 증가되었다. 이는 비장약량을 줄이기 위하여 장약길이를 적게 하였음에도 평균 파쇄입도나 대피의 발생 비율은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 장약길이가 길어지더라도 발파하중이 동일하게 발생되지 않고 한계 장약 길이가 있다는 것을 알 수 있다.

Table 11. Blast Result for Fragmentation

기존 발파	Test #1	Test #2	Test #3
			
			
평균파쇄입도/대피율	평균파쇄입도/대피율	평균파쇄입도/대피율	평균파쇄입도/대피율
36 cm / 5.6 %	38 cm / 7.8 %	29.4 cm / 4.3 %	31.8 cm / 4.8 %

2) 공경을 115mm로 크게 하고 장약장을 줄이기 위하여 Deck Charge를 적용 하였을 때 평균파쇄입도는 22.45 %가 감소하여 가장 양호하고 균일하였고, 대괴 발생률도 30.23%가 감소하였다. 이는 천공경의 증가에 따른 저항선과 공간격도 증가하여 발파 설계를 적용하여야 하며, 전 장약장에 폭발력이 균일하게 발생하도록 할 때 발파 효율이 증가함을 알 수 있다.

3) 기존 발파와 동일한 공경에서 프라이머를 장약길이 중 하부로부터 5.5m 장약하고 장약장을 11% 짧게 하여 시험한 결과 파쇄입도는 13.21%의 감소와 대괴의 발생은 16.67%의 감소를 나타냈다. 이는 장약길이에 따른 발파하중의 감소를 덜어 주면 발파 효율이 증가되는 것을 알 수 있다.

차후 벤치 높이에 따른 적정 천공경과 장약량 및 벤치 발파 패턴에 대하여 수치해석과 병행하여 정량적인 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. AUTODYN User manual
2. ISEE, 1998~2001, Blaster's Hand book
3. Per Arders Persson, 1992, Rock Blasting & Explosives Engineering
4. Simpson et al., 1996, Shock Initiation of 1,3,3-trinitroazetidine
5. Weingart et al, 1976, Acceleration of thin Flyers by Exploding Metal Foils, Proceedings of the 6th Symposium on Detonation, p.653
6. Dr Greg Fairlie, Numerical Simulation of Mine Blast Loading on Structures(17th Military Aspects of Blast Symposium
7. G.W Ma, Modeling of wave Propagation Induced by underground Explosion (Technical report)
8. Konya, 1996, Blast design
9. Split Desktop User Manual